

【発明の名称】 半導体の製造方法及び半導体装置の製造方法

【発明の背景】

本発明は、III-V族化合物半導体及びそれを用いた半導体装置の製造方法に関する。

近年、次世代の高密度光ディスク用光源として青紫色光を出力する半導体レーザー素子に対する要望が高まり、特に波長帯域が青紫色光と比較的に短波長帯で動作可能な窒化ガリウム（GaN）系のIII-V族化合物半導体からなる発光素子の研究開発が盛んに行なわれている。

窒化ガリウム系半導体は、化学的に安定で且つ高硬度であるため、砒化ガリウム（GaAs）又は磷化インジウム（InP）のような他のIII-V族化合物半導体の製造プロセスで用いられているウエットエッチング法を用いることができない。このため、通常、窒化ガリウム系半導体に対するエッチングにはドライエッチング法が用いられている。

しかしながら、ドライエッチング法はウエットエッチング法と比べて、エッチング対象の半導体層を選択的にエッチングしたり、所望の膜厚でエッチングを停止するというような制御が困難である。

例えば、エッチング対象の半導体層におけるエッチングの停止位置が窒化ガリウム系半導体レーザー素子の動作特性にどのような影響を及ぼすかが、論文「第61回応用物理学会学術講演会 講演予稿集第1分冊 p.325(7p-L-4), 2000.9.」に報告されている。この論文には、半導体レーザー素子における動作電流を低減するには、活性層上に設けるp型クラッド層のエッチング後の膜厚を正確に制御する必要があることが述べられている。

また、他の論文「第47回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集第1分冊 p.378(30a-YQ-7), 2000.3.」には、窒化物系半導体レーザー素子に対するドライエッチング時の実時間深さの測定に関する報告がされている。しかしながら、本論文には、半導体層に対するエッチングの制御方法については報告されていない。

ところで、従来の窒化物系半導体に対するドライエッチング処理は、 $Al_xGa_{1-x}N$ （但し、 $0 \leq x \leq 1$ とする）のように、混晶組成がそれぞれ異なる複数の半

導体層の積層体に対して行なわれるため、各半導体層に対してエッチングレート  
をそれぞれ測定しておき、測定された各エッチングレートに基づいてエッチング  
時間を管理しながら行なわれている。

しかしながら、前記従来のIII-V族化合物半導体に対するドライエッチング法  
は、エッチングレートを組成が異なる半導体層ごとに測定し且つ管理する必要が  
ある。その上、温度及びプラズマ状態等のドライエッチング条件をも制御し且つ  
管理する必要があるため、生産性及び歩留りが低下し、さらにはコストの高騰を  
招くという問題がある。

#### 【発明の概要】

本発明は、前記従来の問題を解決し、III-V族化合物半導体に対するエッチン  
グ制御を容易に且つ確実に行なえるようにすることを目的とする。

前記の目的を達成するため、本発明は、エッチング対象となるIII-V族化合物  
半導体の下側の少なくとも一部に、エッチング停止層を設ける構成とする。

具体的に、本発明に係る半導体の製造方法は、第1の半導体層の上に、エッチ  
ング停止層を形成する第1の工程と、エッチング停止層の上に、III-V族化合物  
半導体からなる第2の半導体層を形成する第2の工程とを備え、エッチング停止  
層のドライエッチングによるエッチングレートは、第2の半導体層のエッチング  
レートよりも小さい。

本発明の半導体の製造方法によると、エッチング停止層のドライエッチングに  
よるエッチングレートは、第2の半導体層のエッチングレートよりも小さい。こ  
のため、第2の半導体層に対してドライエッチングを選択的に行なえるので、第  
1の半導体層に対するオーバエッチを防止することができる。すなわち、III-V  
族化合物半導体からなる第2の半導体層に対するドライエッチングの制御性が容  
易となる。

本発明の半導体の製造方法は、第1の工程において、エッチング停止層を、ア  
ルミニウムを含むIII-V族化合物半導体により形成することが好ましい。このよ  
うに、エッチング停止層をIII-V族化合物半導体により形成すると、該エッチン  
グ停止層が第2の半導体層と同等の化合物半導体となるため、第2の半導体層の

結晶性が劣化する虞がない。さらに、アルミニウムを含むIII-V族化合物半導体はエッチングに対する耐性が向上するため、第2の半導体層に対するドライエッチングの選択性が良好となる。その上、通常の半導体製造装置のままでエッチング停止層を形成することができる。

この場合に、第2の半導体層がアルミニウムを含み、第1の工程において、エッチング停止層のアルミニウムの組成を、第2の半導体層のアルミニウムの組成よりも大きくなるように形成することが好ましい。このようにすると、III-V族化合物半導体においてアルミニウムの組成が大きい方がエッチングレートが小さくなるため、エッチング停止層はその機能を確実に発揮することができる。

本発明の半導体の製造方法は、第1の工程において、エッチング停止層を、 $Al_xGa_{1-x}N$ （但し、 $0 \leq x \leq 1$ とする）と $Al_yGa_{1-y}N$ （但し、 $0 \leq y \leq 1$ 、 $x \neq y$ とする）とを交互に積層してなる超格子層とすることが好ましい。

この場合に、エッチング停止層を、波長が約360nm以上且つ500nm以下の光を反射する膜厚を持つ反射鏡とすることが好ましい。このようにすると、製造された半導体からレーザ素子を作製した場合に、該レーザ素子から放出される自然放出光を外部に漏らすことなく、誘導放出光として有効に導くことが可能となる。

本発明の半導体の製造方法において、エッチング停止層が、III-V族窒化物半導体に含まれる元素と、III-V族窒化物半導体の導電性を決定する不純物元素とからなることが好ましい。このようにすると、第2の半導体層がIII-V族窒化物半導体である場合に、エッチング停止層を形成するための新たな原料が不要となる。従って、半導体製造装置に何らの変更を加えることなく、エッチング停止層を容易に且つ確実に形成することができる。

この場合に、III-V族窒化物半導体に含まれる元素が窒素であり、不純物元素がシリコンであることが好ましい。このようにすると、第2の半導体層がIII-V族窒化物半導体からなる場合に、例えば窒素源としてアンモニアを用い、シリコン源としてシランガスを用いれば、エッチング停止層を、例えば窒化シリコンからなる絶縁膜により構成することができる。その結果、第2の半導体層とのエッチング選択比を大きくすることができるので、第2の半導体層に対するエッチン

グ制御性が向上する。

また、この場合に、不純物元素がマグネシウムであることが好ましい。このようにすると、エッチング停止層がp導電型を示すため、導電性に優れたエッチング停止層を得ることができるため、得られた半導体から半導体素子を形成しても、該素子の動作特性に悪影響を与えにくくなる。

この場合のマグネシウムの不純物濃度は、約  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以上であることが好ましい。このように、III-V族窒化物半導体においてマグネシウムの不純物濃度を約  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以上とすると、エッチングレートが低下するため、第2の半導体層に対するエッチング制御性が向上する。

本発明の半導体の製造方法は、第2の工程よりも後に、2の半導体層に対してドライエッチングを行なう第3の工程をさらに備え、第3の工程が、エッチング停止層を検出したときに、第2の半導体層に対するエッチングを停止することが好ましい。このようにすると、第2の半導体層のドライエッチング中に、エッチング停止層を確認することが可能となるため、第2の半導体層に対するエッチングを確実に行なえる。

この場合に、第3の工程が、第2の半導体層の表面にレーザ光を照射し、該レーザ光により励起されて発せられるフォトルミネッセンス光を受光し、受光したフォトルミネッセンス光の波長の変化を検出することにより、エッチング停止層の表面が露出したことを推定する工程とを含むことが好ましい。

また、この場合に、第3の工程が、第2の半導体層の表面にX線を照射し、該X線の回折角度を測定する工程と、第2の半導体層による回折角度の変化を検出することにより、エッチング停止層の表面が露出したことを推定する工程とを含むことが好ましい。

本発明に係る半導体装置の製造方法は、基板上に、活性層を含む第1の半導体層、エッチング停止層及びIII-V族化合物半導体からなる第2の半導体層を順次形成する工程と、第2の半導体層に対して選択的にドライエッチングを行なう工程とを備え、エッチング停止層のドライエッチングによるエッチングレートは、第2の半導体層のエッチングレートよりも小さい。

本発明の半導体装置の製造方法によると、エッチング停止層の上に、III-V族

化合物半導体からなる第2の半導体層を形成する。このエッチング停止層のドライエッチングによるエッチングレートは、第2の半導体層のエッチングレートよりも小さい。従って、第2の半導体層に対してドライエッチングを選択的に行なえるため、エッチング領域に第2の半導体層が残ることもなく、第1の半導体層がエッチングされることもない。すなわち、III-V族化合物半導体からなる第2の半導体層に対するドライエッチングの制御性が容易となる。

#### 【図面の簡単な説明】

図1(a)～図1(c)は本発明の第1の実施形態に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置の製造方法を示す工程順の構成断面図である。

図2(a)～図2(c)は本発明の第1の実施形態に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置の製造方法を示す工程順の構成断面図である。

図3(a)～図3(c)は本発明の第1の実施形態に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置の製造方法を示す工程順の構成断面図である。

図4(a)～図4(c)は本発明の第1の実施形態に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置の製造方法を示す工程順の構成断面図である。

図5(a)～図5(c)は本発明の第1の実施形態に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置の製造方法を示す工程順の構成断面図である。

図6は本発明の第1の実施形態の第1変形例に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置を示す構成断面図である。

図7は本発明の第1の実施形態の第1変形例に係る半導体の製造方法におけるエッチング停止層を示す構成断面図である。

図8は本発明の第1の実施形態の第2変形例に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置を示す構成断面図である。

図9は本発明の第1の実施形態の第2変形例に係る半導体の製造方法におけるエッチング停止層を示す構成断面図である。

図10は本発明の第2の実施形態に係る半導体の製造方法におけるドライエッチング後の走査電子顕微鏡（SEM）で観察したIII-V族窒化物半導体に対するエッチング深さと半導体層ごとのPL波長との関係を示すグラフである。

図11は本発明の第4の実施形態に係る半導体の製造方法におけるエッチング停止層を含む領域を示す部分的な構成断面図である。

図12（a）は本発明の第4の実施形態に係る半導体の製造方法におけるエッチング停止層を示す斜視図である。

図12（b）は本発明の第4の実施形態に係る半導体の製造方法におけるエッチング停止層の上に成長を始めたp型クラッド層を示す斜視図である。

図13は本発明の第5の実施形態に係る半導体の製造方法におけるエッチング停止層を含む領域を示す部分的な構成断面図である。

## 【発明の実施の形態】

### （第1の実施形態）

本発明の第1の実施形態について図面を参照しながら説明する。

図1（a）～図1（c）乃至図5（a）～図5（c）は本発明の第1の実施形態に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置の製造方法の工程順の断面構成を示している。

第1の実施形態においては、エッチング停止層を設けたIII-V族窒化物半導体から半導体レーザ装置を作製する際のドライエッチングによるリッジ部の加工時に、エッチング対象であるp型クラッド層に対するエッチング選択性を容易且つ確実にする。

まず、径が約5.1cm（2インチ）のサファイアからなる基板11を用意し、その表面を酸性の水溶液により洗浄する。続いて、洗浄した基板11を、例えば有機金属気相成長（MOVPE）装置の反応炉内のサセプタ（図示せず）に保持し、反応炉を真空中に排気する。続いて、反応炉内を、圧力が約 $300 \times 133.322 \text{ Pa}$ （300 Torr）の水素雰囲気とし、温度を約 $1100^\circ\text{C}$ にまで昇

温し基板 11 を加熱して、基板表面のサーマルクリーニングを約 10 分間行なう。

次に、図 1 (a) に示すように、反応炉を約 500℃にまで降温した後、基板 11 上に、供給量が約  $25 \mu\text{mol}/\text{min}$  のトリメチルガリウム (TMG) と、供給量が約  $7.5 \text{ L}/\text{min}$  のアンモニア ( $\text{NH}_3$ ) ガスと、水素からなるキャリアガスとを同時に供給することにより、厚さが約 20 nm の窒化ガリウム (GaN) からなる低温バッファ層 (図示せず) を成長する。このとき、V 族原料であるアンモニアガスと III 族原料である TMG との供給比の値は、約 6500 である。

続いて、反応炉内の温度を約 1000℃にまで昇温し、n 型ドーパントとしてシラン ( $\text{SiH}_4$ ) ガスをも供給しながら、低温バッファ層の上に、厚さが約  $4 \mu\text{m}$  でシリコン (Si) の不純物濃度が約  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の n 型 GaN からなる n 型コンタクト層 12 を成長する。続いて、n 型コンタクト層 12 の上に、II I 族原料としてトリメチルアルミニウム (TMA) をも供給しながら、厚さが約  $0.7 \mu\text{m}$  で Si の不純物濃度が  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の n 型  $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$  からなる n 型クラッド層 13 を成長する。続いて、n 型クラッド層 13 の上に、厚さが約 100 nm で Si の不純物濃度が約  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の n 型 GaN からなる n 型光ガイド層 14 を成長する。

その後、反応炉内の温度を約 800℃にまで降温し、キャリアガスを水素から窒素に変更し、厚さが約 3 nm の  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  からなる 3 層の歪量子井戸と、厚さが約 9 nm の GaN からなる 2 層のバリア層とを交互に積層して、多重量子井戸 (MQW) 活性層 15 を成長する。ここで、歪量子井戸層の成長時には、II I 族原料に TMI と TMG とを供給し、バリア層の成長時には、III 族原料に TMG を供給する。

その後、再度、反応炉内の温度を約 1000℃にまで昇温し、キャリアガスを窒素から水素に戻して、基板 11 上に、III 族原料の TMA 及び TMG と、V 族原料のアンモニアガスと、p 型ドーパントであるビスシクロペンタジエニルマグネシウム ( $\text{Cp}_2\text{Mg}$ ) ガスとを供給しながら、MQW 活性層 15 の上に、厚さが約 20 nm で Mg の不純物濃度が約  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の p 型  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$  からなるキャップ層 16 を成長する。続いて、キャップ層 16 の上に、TMA

の供給を止めて、厚さが約100nmでMgの不純物濃度が約 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型GaNからなるp型光ガイド層17を成長する。

続いて、III族原料にTMAを追加して、p型光ガイド層17の上に、厚さが約200nmでMgの不純物濃度が約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$ からなるp型第1クラッド層18を成長する。続いて、p型第1クラッド層18の上に、アルミニウムの組成がp型第1クラッド層18よりも大きく且つ厚さが約50nmでMgの不純物濃度が約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ からなるエッチング停止層19Aを成長する。続いて、エッチング停止層19Aの上に、厚さが約0.4 $\mu\text{m}$ でMgの不純物濃度が約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$ からなるp型第2クラッド層20を成長する。

ドライエッチング法により、p型半導体層に電流狭搾用のリッジ部を形成する際には、エッチング停止層19Aでエッチングを停止するため、p型クラッド層として光学的に機能するp型半導体層のエッチング後の残し厚は、厚さが約200nmのp型第1クラッド層18と、厚さが約50nmのエッチング停止層19Aとの約250nmとなる。ここで、半導体層のエッチング後の残し厚とは、半導体層におけるエッチング後に残したい部分の設計膜厚をいう。その後、p型第2クラッド層20の上に、厚さが約0.1 $\mu\text{m}$ でMgの不純物濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型GaNからなるp型コンタクト層21を成長する。

次に、図1(b)に示すように、p型コンタクト層21まで成長した基板11を反応炉から取り出し、p型コンタクト層21の表面を有機溶剤により洗浄し、さらにフッ酸系のウエットエッチングによりクリーニングした後、例えばプラズマCVD法を用いて、p型コンタクト層21の上に全面にわたって厚さが約0.1 $\mu\text{m}$ の二酸化シリコン( $\text{SiO}_2$ )からなる第1の酸化絶縁膜22Aを堆積する。

次に、図1(c)に示すように、スピナーを用いて、第1の酸化絶縁膜22Aの上に全面にわたって第1のレジスト膜51Aを塗布する。

次に、図2(a)に示すように、フォトリソグラフィ法により、第1のレジスト膜51Aから、マスク幅が約2 $\mu\text{m}$ で且つ約500 $\mu\text{m}$ ピッチのストライプ状の第1のレジストパターン51Bを、窒化ガリウム結晶の晶帯軸の<1-100>方向に延びるように形成する。なお、本願明細書においては、晶帯軸を表わす



指数の反転は、便宜上、反転を示す指数の前に負符号“－”を付すことによって表わす。

次に、図2(b)に示すように、第1のレジストパターン51Bをマスクとして、第1の酸化絶縁膜22Aに対して、フッ酸系の水溶液を用いたウェットエッチングを行なって、第1の酸化絶縁膜22Aから、ストライプ形状が転写された第1の絶縁性パターン22Bを形成する。その後、図2(c)に示すように、第1のレジストパターン51Bを有機溶剤により除去する。

次に、図3(a)に示すように、第1の絶縁性パターン22Bをマスクとして、p型第2クラッド層20に対して、例えば塩素( $\text{Cl}_2$ )ガスを用いたドライエッチングを行なうことにより、p型第2クラッド層を、第1の絶縁性パターン22Bが転写されたリッジ形状にパターンニングする。ここでは、p型第2クラッド層20のエッチングは、あらかじめ設定したエッチング時間に基づいて行なう。

第1の実施形態においては、エッチング対象のp型第2クラッド層20の下にエッチング停止層19Aを設けているため、エッチング時間のマージンが大きくなるので、p型第1クラッド層18に対するエッチングが防止され、所定の厚さが確保されるので、所定の光学的特性を得ることができる。

次に、図3(b)に示すように、プラズマCVD法を用いて、エッチング停止層19の上に、リッジ状のp型第2クラッド層20、p型コンタクト層21及び第1の絶縁性パターン22Bを含む全面にわたって、厚さが約 $0.1\mu\text{m}$ の二酸化シリコンからなる第2の酸化絶縁膜22Cを堆積する。

次に、図3(c)に示すように、スピナーを用いて、第2の酸化絶縁膜22Cの上に全面にわたって第2のレジスト膜52Aを塗布する。

次に、図4(a)に示すように、フォトリソグラフィ法により、第2のレジスト膜52Aから、マスク幅が約 $40\mu\text{m}$ で且つピッチが約 $500\mu\text{m}$ のストライプ状の第2のレジストパターン52Bを、窒化ガリウム結晶の晶帯軸の $\langle 1-100 \rangle$ 方向に延び且つその中央部分でp型コンタクト層21を覆うように形成する。

次に、図4(b)に示すように、第2のレジストパターン52Bをマスクとして、第2の酸化絶縁膜22Cに対して、フッ酸系の水溶液を用いたウェットエッ

チングを行なって、第2の酸化絶縁膜22Cから、第2のレジストパターン52Bのストライプ形状が転写された第2の絶縁性パターン22Dを形成する。その後、図4(c)に示すように、第2のレジストパターン52Bを有機溶剤により除去する。

次に、図5(a)に示すように、第2の絶縁性パターン22Dをマスクとして、n型コンタクト層12が露出するまで、例えば塩素( $\text{Cl}_2$ )ガスを用いたドライエッチングを行なう。

次に、図5(b)に示すように、蒸着法等により、露出したn型コンタクト層12の上面に、チタン(Ti)とアルミニウム(Al)との積層体からなるn側電極23を形成する。

次に、図5(c)に示すように、第2の絶縁性パターン22Dに対してフッ酸系の水溶液によるウェットエッチングを選択的に行なって、p型コンタクト層21を露出する。続いて、蒸着法等により、第2の絶縁性パターン22D及びp型コンタクト層21の上面に、ニッケル(Ni)と金(Au)との積層体からなり、p型コンタクト層21と電氣的に接続されるp側電極24を形成する。

次に、図示はしていないが、レーザ素子の共振器構造を、ドライエッチング及びへき開によって形成し、その後、へき開した共振器の各端面にそれぞれ反射率が90%及び70%の、二酸化シリコン及び二酸化チタンからなる高反射コートを形成する。ここでは、共振器長は1mm程度としている。

以上説明したように、第1の実施形態は、半導体レーザ素子を構成する半導体層における、エッチング対象の半導体層の下側にドライエッチング用のエッチング停止層19を設けていることを特徴とする。

エッチング停止層19を設けた半導体層から半導体レーザ装置を作製すると、以下に述べるように優れた動作特性を達成することができる。

第1の実施形態に係る半導体レーザ装置は、図3(a)に示すドライエッチング工程において、エッチング対象であるp型第2クラッド層20に対してドライエッチングを行なう際には、p型第2クラッド層20の下側に設けたp型Al<sub>0.10</sub>Ga<sub>0.90</sub>Nからなるエッチング停止層19Aにより、エッチング時間にマージンが生じる。なぜなら、エッチング停止層19Aのエッチングレートは、Alの

組成が0.10であり、第2 p型クラッド層20のA1の組成の0.07よりも大きいため、p型第2クラッド層20のエッチングレートよりも小さくなるからである。

従って、p型第2クラッド層20に対するエッチング量（深さ）は、時間で制御するものの、エッチング時間が所定時間を超えてしまったような場合であっても、エッチング停止層19Aに対するエッチングレートはp型第2クラッド層20のエッチングレートよりも小さくなる。このため、第1のp型クラッド層18は所定の膜厚を、容易に且つ確実に残すことができ、ドライエッチングによる加工時の膜厚の制御性が向上する。

第1の実施形態により作製した半導体レーザ装置に、実際に室温で直流電流を印加すると、連続発振動作に到り、レーザ発振のしきい値電流は約45mAで、スロープ効率は約1.0W/Aであることを確認している。

一方、エッチング停止層19Aを設けない従来の半導体レーザ装置は、室温で連続発振するものの、しきい値電流は約70mAで、スロープ効率は約0.5W/Aである。

このように、第1の実施形態によると、エッチング対象のp型第2クラッド層20の下側にエッチング停止層19Aを形成するため、第1p型クラッド層18の膜厚（残し厚）を高精度で制御できるようになる。このため、p型第2クラッド層20にエッチング残りが生じることなく、且つ、第1p型クラッド層18の膜厚にも、所望の膜厚、すなわち最適値を得ることができる。その結果、MQW活性層15における光閉じ込め効率が大幅に改善される。これは、MQW活性層15に対するエッチングダメージが防止されていることによる。

さらに、基板11上にエッチング停止層19Aを形成すると、径が約5.1cmの基板面内で、エッチングの残し厚のばらつきが抑制されるため、半導体レーザ装置の歩留りが向上するので、コストの低減に大きく寄与する。

（第1の実施形態の第1変形例）

以下、本発明の第1の実施形態の第1変形例について図面を参照しながら説明する。

図6は本発明の第1の実施形態の第1変形例に係る半導体の製造方法及び該半

導体を用いた半導体レーザ装置の断面構成を示している。図6において、図5(c)に示す構成部材と同一の構成部材には同一の符号を付すことにより説明を省略する。

第1変形例に係るエッチング停止層19Bは、超格子構造により形成されていることを特徴とする。そのエッチング停止層19Bの形成方法について図7を用いて説明する。

図7は第1変形例に係るエッチング停止層19Bの断面構成を示している。

まず、図7に示すように、MOVPE法等により、第1の実施形態と同様に、p型 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$ からなるp型第1クラッド層18を成長し、続いて、それぞれ、厚さが約5nmで、Mgの不純物濃度が約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ である、p型 $\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ からなる第1層19aとp型 $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ からなる第2層19bとを1対とし、これを5対分成長させることにより、総膜厚が約50nmの超格子構造を持つエッチング停止層19Bを形成する。

続いて、エッチング停止層19Bの上に、厚さが約 $0.4 \mu\text{m}$ でMgの不純物濃度が約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$ からなるp型第2クラッド層20を成長する。

この後は、第1の実施形態と同様に、p型コンタクト層21を成長し、さらに、p型コンタクト層21及びp型第2クラッド層20に対して、エッチング停止層19Bが露出するまで、リッジ状のドライエッチングを行なう。さらに、n側電極23を設けるためのドライエッチングと、p側電極24を形成する。

第1変形例に係る半導体レーザ装置は、p型第2クラッド層20に対してドライエッチングを行なう際には、p型第2クラッド層20の下側に設けた、p型 $\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ からなる第1層19a及びp型 $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ からなる第2層19bを1対とする5対分の超格子構造を有するエッチング停止層19Bにより、エッチング時間にマージンが生じる。なぜなら、エッチング停止層19Bのエッチングレートは、Alの平均組成が0.06と第2p型クラッド層20のAlの組成の0.07よりも小さいものの、超格子構造における第2層19bのAlの組成が0.10であり、第2p型クラッド層20のAlの組成よりも大きいからである。

従って、p型第2クラッド層20に対するエッチング量（深さ）は、時間で制御はするが、エッチング時間が所定時間を超えてしまったような場合であっても、エッチング停止層19Bに対するエッチングレートはp型第2クラッド層20のエッチングレートよりも小さくなる。このため、第1のp型クラッド層18は所定の膜厚を、容易に且つ確実に残すことができ、ドライエッチングによる加工時の膜厚の制御性が向上する。

第1変形例により作製した半導体レーザ装置に、実際に室温で直流電流を印加すると、連続発振動作に到り、レーザ発振のしきい値電流は約45mAで、スロープ効率は約1.0W/Aであることを確認している。

このように、第1変形例によると、エッチング対象のp型第2クラッド層20の下側に超格子構造を有するエッチング停止層19Bを形成するため、第1p型クラッド層18の膜厚（残し厚）を高精度で制御できるようになる。その結果、第1p型クラッド層18の膜厚に、所望の膜厚、すなわち最適値を得ることができ。これにより、MQW活性層15における光閉じ込め効率が大幅に改善される。これは、MQW活性層15に対するエッチングダメージが防止されていることによる。

さらに、基板11上にエッチング停止層19Bを形成すると、径が約5.1cmの基板面内で、エッチングの残し厚のばらつきが抑制されるため、半導体レーザ装置の歩留りが向上するので、コストの低減に大きく寄与する。

#### （第1の実施形態の第2変形例）

以下、本発明の第1の実施形態の第2変形例について図面を参照しながら説明する。

図8は本発明の第1の実施形態の第2変形例に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置の断面構成を示している。図8において、図5（c）に示す構成部材と同一の構成部材には同一の符号を付すことにより説明を省略する。

第2変形例に係るエッチング停止層19Cは、ブラッグ反射鏡となる超格子構造により形成されていることを特徴とする。これにより、第2変形例と同様の効果を得られる上に、MQW活性層15における光閉じ込め効率が向上する。

図9は第2変形例に係るエッチング停止層19Cの断面構成を示している。

まず、図9に示すように、MOVPE法等により、第1の実施形態と同様に、p型 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$ からなるp型第1クラッド層18を成長し、続いて、それぞれMgの不純物濃度が約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であり、厚さが約45nmのp型 $\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ からなる第1層19aと、厚さが約40nmのp型 $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ からなる第2層19bとを1対とし、これを5対分成長させることにより、総膜厚が約425nmの超格子構造を持つエッチング停止層19Cを形成する。エッチング停止層19Cにおける超格子構造の各膜厚は、 $\lambda / (4n)$ により設計される。ここで、 $\lambda$ はレーザ装置の発振波長を示し、 $n$ は超格子構造の各層19a、19bの屈折率を示す。この膜厚はブラッグ反射を起こす膜厚であるため、MQW活性層15から外部に漏れる光（迷光）が減少するので、MQW活性層15における光閉じ込め効率が向上する。

続いて、エッチング停止層19Cの上に、厚さが約 $0.4 \mu\text{m}$ でMgの不純物濃度が約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$ からなるp型第2クラッド層20を成長する。

この後は、第1の実施形態と同様に、p型コンタクト層21を成長し、さらに、p型コンタクト層21及びp型第2クラッド層20に対して、エッチング停止層19Cが露出するまで、リッジ状のドライエッチングを行なう。さらに、n側電極23を設けるためのドライエッチングと、p側電極24を形成する。

第2変形例に係る半導体レーザ装置は、第1変形例と同様に、p型第2クラッド層20に対してドライエッチングを行なう際には、p型第2クラッド層20の下側に設けた、p型 $\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ からなる第1層19a及びp型 $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ からなる第2層19bを1対とする5対分の超格子構造を有するエッチング停止層19Cにより、エッチング時間にマージンが生じる。

従って、p型第2クラッド層20に対するエッチング量（深さ）は、時間で制御はするが、エッチング時間が所定時間を超えてしまったような場合であっても、エッチング停止層19Cに対するエッチングレートはp型第2クラッド層20のエッチングレートよりも小さくなる。このため、第1のp型クラッド層18は所定の膜厚を、容易に且つ確実に残すことができ、ドライエッチングによる加工時

の膜厚の制御性が向上する。

第2変形例により作製した半導体レーザ装置に、実際に室温で直流電流を印加すると、連続発振動作に到り、レーザ発振のしきい値電流は約45mAで、スロープ効率は約1.0W/Aであることを確認している。

このように、第2変形例によると、エッチング対象のp型第2クラッド層20の下側に超格子構造を有するエッチング停止層19Bを形成するため、第1p型クラッド層18の膜厚（残し厚）を高精度で制御できるようになる。その結果、第1p型クラッド層18の膜厚に、所望の膜厚、すなわち最適値を得ることができる。これにより、MQW活性層15への光閉じ込め効率が大幅に改善される。これは、MQW活性層15に対するエッチングダメージが防止されていることによる。

その上、エッチング停止層19Cは、これを構成する第1層19a及び第2層19bの各膜厚をブラッグ反射を起こすように設定された超格子構造を有するため、MQW活性層15における光閉じ込め効率が向上したことにもよる。

また、基板11上にエッチング停止層19Bを形成すると、径が約5.1cmの基板面内で、エッチングの残し厚のばらつきが抑制されるため、半導体レーザ装置の歩留りが向上するので、コストの低減に大きく寄与する。

なお、第1の実施形態においては、エッチング停止層19A、19B、19Cをp型第1クラッド層18の上に形成しているが、各エッチング停止層19A、19B、19Cは、いずれも他の半導体層と成長の一環として結晶成長により形成されるため、その形成位置は設計により容易に変更できる。

また、第1の実施形態及びその変形例においては、エッチング停止層19A、19B、19Cを第1p型クラッド層18の全面に形成したが、部分的に形成してもよい。但し、この場合には、第1p型クラッド層18の面内におけるエッチングむらを考慮して、複数箇所に分散してエッチング停止層19A、19B、19Cを形成することが好ましい。例えば、図5(c)において、第1p型クラッド層18上における第2の絶縁性パターン22Dにより覆われない領域に、エッチング停止層19A、19B、19Cを形成すると、該エッチング停止層19A、19B、19Cは、最終的にレーザ構造から除去されるため、半導体レーザ装置

の動作特性に影響を与えることが一切なくなる。その結果、エッチング停止層 19 A、19 B、19 Cはその光学的電気的特性に規制されなくなるので、各エッチング停止層 19 A、19 B、19 Cの構成の自由度がそれぞれ大きくなる。

また、第 1 の実施形態及びその変形例においては、基板 11 の表面側から該基板 11 に向かってエッチングを行なっているが、これに限らず、基板 11 の表面側以外の面から、例えば側面側からドライエッチングを施して、エッチング停止層 19 A、19 B、19 Cのみを選択的に残し、積層された半導体層の側面を凹凸状とすることも可能である。この半導体側面に形成された凹凸形状をデバイス形成時に応用しても良い。

#### (第 2 の実施形態)

以下、本発明の第 2 の実施形態について図面を参照しながら説明する。

第 1 の実施形態においては、エッチング停止層 19 A の上側に形成されたエッチング対象となる半導体層に対するドライエッチングをエッチング時間で制御しているが、第 2 の実施形態においては、エッチング停止層を光学的に検出することにより、エッチング時間に依らずに、エッチング対象の半導体層に対する選択的なドライエッチングを可能とする。

そこで、第 2 の実施形態に係るドライエッチング装置には、ヘリウム (He) - カドミウム (Cd) レーザ装置と光検出器とを備えている。このため、エッチング中の試料 (ウエハ) を装置から取り出すことなく、ドライエッチング装置内において、He - Cd レーザ光を試料の表面に入射することにより、エッチング中の半導体層の表面を光学的に励起し、励起後に放出されるフォトルミネッセンス (PL) 光を光検出器で検出する。

このように、エッチング中に、PL 光の波長の変化、すなわち p 型第 2 クラッド層 20 とエッチング停止層 19 A との差を検出することにより、エッチング停止層 19 A の表面を実時間で且つ非接触で確認することができる。

ここで、図 10 にドライエッチング後の走査電子顕微鏡 (SEM) で観察した III-V 族窒化物半導体に対するエッチング深さと半導体層ごとの PL 波長との関係を示す。ここで、半導体は第 1 の実施形態において作製した III-V 族窒化物半導体とし、図 10 において、半導体層と対応するグラフには、各半導体層に付し



た符号と同一の符号を付している。

図10に示すように、 $p$ 型 $Al_{0.07}Ga_{0.93}N$ からなる $p$ 型第2クラッド層20のエッチング時には、検出されるPL光の波長は、室温におけるピーク波長として350nm程度である。さらに、エッチングが進行して、エッチング表面が、 $p$ 型 $Al_{0.10}Ga_{0.90}N$ からなるエッチング停止層19Aに近づくと、検出されるPL光の波長が345nm程度と、 $p$ 型第2クラッド層20の場合と比べて短い波長を検出するようになる。これは、前述したように、エッチング停止層19AのAlの組成が $p$ 型第2クラッド層72のAlのAlの組成よりも大きいためである。

また、エッチング表面がエッチング停止層19Aの最表面に到達すると、エッチング停止層19AからのPL発光強度が最大となるため、その発光強度を測定することによっても、エッチング停止層19Aの表面を確認することができる。

このように、エッチング停止層19AからのPL光を検出した段階でエッチングを停止すると、エッチング停止層19Aを残したまま、 $p$ 型第2クラッド層20に対するドライエッチングを確実に停止できる。その結果、レーザ装置の光学的特性に影響を与える $p$ 型第1クラッド層48の膜厚（残し厚）に、時間制御に依らずに所定値を得られるようになり、残し厚の制御性が向上する。

すなわち、第2の実施形態によると、第1の実施形態のように、エッチング停止層19Aを半導体層中に形成しておき、さらに、ドライエッチング装置を、エッチング対象の半導体層のエネルギーギャップよりも大きいエネルギーに相当する波長を発振するレーザ装置と光検出器とを設ける構成とする。これにより、 $p$ 型クラッド層に対して、その残し厚を所望の膜厚となるように高精度に加工することができ、その結果、MQW活性層15における光閉じ込め効率が大幅に改善される。また、MQW活性層15に対するエッチングダメージも回避される。

なお、エッチング停止層は、第1の実施形態で示したエッチング停止層19Aに限られず、第1の実施形態の各変形例に示したエッチング停止層19B、19Cであっても良い。

### （第3の実施形態）

以下、本発明の第3の実施形態について図面を参照しながら説明する。

第3の実施形態も、第2の実施形態と同様に、エッチング停止層を光学的に検出することにより、エッチング時間に依らずに、エッチング対象の半導体層に対する選択的なドライエッチングを可能とする。

そこで、第3の実施形態に係るドライエッチング装置には、X線発生装置とX線検出器とを備えている。このため、エッチング中の試料（ウエハ）を装置から取り出すことなく、ドライエッチング装置内で、X線を試料の表面に入射することにより、エッチング中の半導体層の表面からの回折線をX線検出器により検出することができる。これにより、第1の実施形態と同様の構成を持つ半導体に含まれるエッチング停止層19Aの表面を実時間で且つ非接触で確認することができる。

例えば、4結晶X線回折（XRD）装置を用いた場合には、p型Al<sub>0.07</sub>Ga<sub>0.93</sub>Nからなるp型第2クラッド層20のエッチング時に検出される、面方位（0002）面からの回折角度（2θ）は34.7°程度である。さらに、エッチングが進行して、エッチング表面が、p型Al<sub>0.10</sub>Ga<sub>0.90</sub>Nからなるエッチング停止層19Aに近づくと、検出される回折角度（2θ）は34.8°程度を検出するようになる。これは、前述したように、エッチング停止層19AのAlの組成がp型第2クラッド層72のAlの組成よりも大きいためである。ちなみに、この場合のGaNにおける（0002）面からの回折角度は34.6°である。

また、エッチング表面がエッチング停止層19Aの最表面に到達すると、エッチング停止層19AからのX線回折強度が最大となるため、その回折強度を測定することによっても、エッチング停止層19Aの表面を確認することができる。

このように、エッチング停止層19AからのX線回折角度を検出した段階でエッチングを停止すると、エッチング停止層19Aを残したまま、p型第2クラッド層20に対するドライエッチングを確実に停止できる。その結果、レーザ装置の光学的特性に影響を与えるp型第1クラッド層48の膜厚（残し厚）に、時間制御に依らずに所定値を得られるようになり、残し厚の制御性が向上する。

すなわち、第3の実施形態によると、第1の実施形態のように、エッチング停止層19Aを半導体層中に形成しておき、さらに、ドライエッチング装置を、X

線発生装置とX線検出器とを設ける構成とする。これにより、p型クラッド層に対して、その残し厚を所望の膜厚となるように高精度に加工することができ、その結果、MQW活性層15における光閉じ込め効率が大幅に改善される。また、MQW活性層15に対するエッチングダメージも回避される。

なお、エッチング停止層は、第1の実施形態で示したエッチング停止層19A以外にも、第1の実施形態の各変形例に示したエッチング停止層19B、19Cの構成であっても良い。

#### (第4の実施形態)

以下、本発明の第4の実施形態について図面を参照しながら説明する。

図11は本発明の第4の実施形態に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置の断面の一部を示している。

第4の実施形態は、エッチング停止層を、III-V族窒化物半導体に含まれる元素と、III-V族窒化物半導体の導電性を決定する不純物元素（ドーパント）とにより構成し、特に窒化シリコン（SiN）からなる絶縁膜とする。

図11に示すように、まず、第1の実施形態と同様に、反応炉内の温度を約1000℃、キャリアガスを水素とし、基板上に、III族原料のTMA及びTMGと、V族原料のNH<sub>3</sub>ガスと、p型ドーパントであるCp<sub>2</sub>Mgガスとを供給しながら、p型Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nからなるキャップ層31を成長する。

続いて、キャップ層31の上に、TMAの供給を止めて、厚さが約100nmでMgの不純物濃度が約 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型GaNからなるp型光ガイド層32を成長する。

次に、p型ドーパントを含むCp<sub>2</sub>MgガスとTMGとの供給を停止して、V族原料のNH<sub>3</sub>ガスと水素からなるキャリアガスとをp型光ガイド層32上に供給する。ここで、n型ドーパントを含むSiH<sub>4</sub>ガスを供給すると、NH<sub>3</sub>ガスとSiH<sub>4</sub>ガスとが反応して、窒化シリコン（SiN）からなるエッチング停止層33がp型光ガイド層32上に堆積する。SiNからなるエッチング停止層33の膜厚は、SiH<sub>4</sub>ガスの供給時間で制御することができ、ここではその厚さを約20nmとしている。

その後、SiH<sub>4</sub>ガスの供給を停止して、エッチング停止層33の上に、TM

G、TMA及びCp<sub>2</sub>Mgガスを再度供給することにより、厚さが約0.7 μmでMgの不純物濃度が約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型Al<sub>0.07</sub>Ga<sub>0.93</sub>Nからなるp型クラッド層34を成長する。この場合、エッチング停止層33上におけるp型クラッド層34の成長は比較的容易である。なぜなら、図12(a)に示すように、エッチング停止層33は一様で緻密な膜ではなく、p型光ガイド層32が部分的に露出するような孔33aが空いている。その結果、図12(b)に示すように、孔33aから、p型クラッド層34が選択的に成長する。但し、エッチング停止層33の膜厚を大きくし過ぎると、孔33aが消失してしまう虞があるため、エッチング停止層33の厚さは、100 nm程度以下とすることが好ましい。

なお、第4の実施形態においては、p型光ガイド層32の上にエッチング停止層33を形成したが、該エッチング停止層33は結晶成長の一環として行なうため、その形成位置は設計により容易に変更できる。但し、エッチング停止層33の上にp型クラッド層34を成長する際に、該p型クラッド層34が多結晶化することも考えられる。これは、成長時におけるアルミニウムの拡散長が小さいことに起因する。この場合、エッチング停止層33の上にはアルミニウムを含まないp型Ga<sub>0.93</sub>Al<sub>0.07</sub>N層を成長した後、p型Al<sub>0.07</sub>Ga<sub>0.93</sub>Nからなるp型クラッド層34を成長することにより、p型クラッド層34の多結晶化を抑制することができる。

その後は、p型クラッド層34の上に、厚さが約0.1 μmでMgの不純物濃度が約 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga<sub>0.93</sub>Al<sub>0.07</sub>Nからなるp型コンタクト層35を成長する。

続いて、第1の実施形態と同様に、p型コンタクト層35及びp型クラッド層34に対して、ドライエッチングによりリッジ状のパターニングを行なう。このとき、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>からなるエッチング停止層33は、そのエッチングレートがAl<sub>0.07</sub>Ga<sub>0.93</sub>Nからなるp型クラッド層34のエッチングレートの約100分の1であるため、p型クラッド層34と比べてエッチングされにくいので、エッチング停止層33は十分にその機能を果たすことができる。

ドライエッチング時におけるp型クラッド層34に対するエッチングモニタは、第2の実施形態と同様に、PL光を観測する場合には、p型クラッド層34に相

当するPLスペクトルが消失し、且つ、p型光ガイド層32に相当するPLスペクトルが出現しないという現象から、進行中のエッチングがエッチング停止層33に到達したことを確認することができる。

また、エッチングモニタに第3の実施形態と同様のX線を用いる場合には、p型クラッド層34に相当する回折ピークが消失し、次いで、エッチング停止層33に相当する回折ピークが出現し、そのピーク強度が最大となる現象から、進行中のエッチングがエッチング停止層33に到達したことを確認することができる。

第4の実施形態により作製した半導体レーザ装置に、実際に室温で直流電流を印加すると、連続発振動作に到り、その動作特性は第1の実施形態に係る半導体レーザ装置と同程度である。第4の実施形態に係るエッチング停止層33は絶縁性であるため、活性層への電流注入が困難となる虞があるが、第4の実施形態に係る半導体レーザ装置は、電流注入が阻害されることはないことを確認している。これは、エッチング停止層33の膜厚を約20nmと薄膜化したことにより、注入される電流が、エッチング停止層33をトンネル電流として通過したと考えられる。

このように、第4の実施形態によると、エッチング対象のp型クラッド層34の下側にエッチング停止層33を形成するため、p型クラッド層34の膜厚（残し厚）を高精度で制御できるようになる。このため、p型クラッド層34にエッチング残りが生じることなく、所望の膜厚、すなわち最適値を得ることができる。その結果、MQW活性層における光閉じ込め効率が大幅に改善される。これは、MQW活性層に対するエッチングダメージが防止されていることによる。

さらに、基板上にエッチング停止層33を形成すると、径が約5.1cmの基板面内で、エッチングの残し厚のばらつきが抑制されるため、半導体レーザ装置の歩留りが向上するので、コストの低減に大きく寄与する。

なお、第4の実施形態においては、エッチング停止層33をp型クラッド層32の全面に形成したが、部分的に形成してもよい。但し、この場合には、p型クラッド層32の面内におけるエッチングむらを考慮して、複数箇所に分散してエッチング停止層33を形成することが好ましい。例えば、p型クラッド層32上におけるレーザ構造から除去される領域に形成すると、半導体レーザ装置の動作

特性に影響を与えることが一切なくなる。その結果、エッチング停止層 33 はその光学的電気的特性に規制されなくなるので、エッチング停止層 33 の構成の自由度が大きくなる。

また、第 4 の実施形態においては、基板の表面側から該基板に向かってエッチングを行なうが、これに限らず、基板の表面側以外の面から、例えば側面側からドライエッチングを施して、エッチング停止層 33 のみを選択的に残し、積層された半導体層の側面を凹凸状とすることも可能である。この半導体側面に形成された凹凸形状をデバイス形成時に応用しても良い。

#### (第 5 の実施形態)

以下、本発明の第 5 の実施形態について図面を参照しながら説明する。

図 13 は本発明の第 5 の実施形態に係る半導体の製造方法及び該半導体を用いた半導体レーザ装置の断面の一部を示している。

第 5 の実施形態は、エッチング停止層を、III-V 族窒化物半導体に含まれる元素と、III-V 族窒化物半導体の導電性を決定する不純物元素（ドーパント）とにより構成し、特に p 型不純物を高濃度に含む III-V 族窒化物半導体からなる導電膜とする。

図 11 に示すように、まず、第 1 の実施形態と同様に、反応炉内の温度を約 1000℃、キャリアガスを水素とし、基板上に、III 族原料の TMA 及び TMG と、V 族原料の NH<sub>3</sub> ガスと、p 型ドーパントである Cp<sub>2</sub>Mg ガスとを供給しながら、p 型 Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>N からなるキャップ層 41 を成長する。

続いて、キャップ層 41 の上に、TMA の供給を止めて、厚さが約 100 nm で Mg の不純物濃度が約  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の p 型 GaN からなる p 型光ガイド層 42 を成長する。

次に、p 型光ガイド層 42 の成長時における TMG の供給量を維持した状態で、Cp<sub>2</sub>Mg ガスのみを過剰に供給する。このように、Cp<sub>2</sub>Mg ガスを過剰に供給すると、p 型光ガイド層 42 の上面に成長する p 型 GaN 層におけるマグネシウム (Mg) の不純物濃度が上昇し、p<sup>+</sup> 型 GaN からなるエッチング停止層 43 が成長する。p<sup>+</sup> 型 GaN からなるエッチング停止層 43 の厚さは、Cp<sub>2</sub>Mg ガスの供給時間で制御することができ、ここではその厚さを約 20 nm として

いる。

具体的には、 $\text{Cp}_2\text{Mg}$  ガスの供給量を、2 次イオン質量分析 (SIMS) 法による測定値で  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ( $\text{Mg}$  の不純物濃度では  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 程度から  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  程度に 1 桁増大することにより、エッチング停止層 4 3 を成長する。

その後、 $\text{Cp}_2\text{Mg}$  ガスの供給量を元に戻して、エッチング停止層 4 3 上に TMA を再度供給することにより、厚さが約  $0.7 \mu\text{m}$  で  $\text{Mg}$  の不純物濃度が約  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の p 型  $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$  からなる p 型クラッド層 4 4 を成長する。続いて、TMA の供給を停止して、p 型クラッド層 4 4 の上に、厚さが約  $0.1 \mu\text{m}$  で  $\text{Mg}$  の不純物濃度が約  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の p 型  $\text{GaN}$  からなる p 型コンタクト層 4 5 を成長する。但し、エッチング停止層 4 3 は、 $\text{Mg}$  の導入量が過剰であるため、該エッチング停止層 4 3 の上に p 型クラッド層 4 4 を成長する際に、該 p 型クラッド層 4 4 にヒロックが発生し、結晶表面状態 (モロロジー) が劣化する虞がある。この場合には、エッチング停止層 4 3 の厚さを  $100 \text{ nm}$  程度以下とすることにより、結晶表面状態の劣化を抑制することができる。

なお、第 5 の実施形態においては、p 型光ガイド層 4 2 の上にエッチング停止層 4 3 を形成したが、該エッチング停止層 4 3 は結晶成長の一環として行なうため、その形成位置は設計により容易に変更できる。

その後は、第 1 の実施形態と同様に、p 型コンタクト層 4 5 及び p 型クラッド層 4 4 に対して、ドライエッチングによりリッジ状のパターニングを行なう。このとき、 $\text{Mg}$  の SIMS 法による濃度が約  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  のエッチング停止層 4 3 は、そのエッチングレートが  $\text{Mg}$  の不純物濃度が約  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の p 型クラッド層 4 4 のエッチングレートの約 50 分の 1 であるため、p 型クラッド層 4 4 と比べてエッチングされにくいので、エッチング停止層 4 3 は十分にその機能を果たすことができる。また、エッチング停止層 4 3 は導電性を有するため、活性層に対する注入電流の妨げとはならず、該レーザ装置の動作特性に悪影響を与える虞がない。

ドライエッチング時における p 型クラッド層 4 4 に対するエッチングモニタは、第 2 の実施形態と同様に、PL 光を観測する場合には、p 型クラッド層 4 4 に相

当するPLスペクトルが消失し、且つ、エッチング停止層43に起因する波長420nm程度のPLスペクトルが出現するという現象から、進行中のエッチングがエッチング停止層43に到達したことを確認することができる。この場合420nmというPLスペクトルは、エッチング停止層43にマグネシウムが過剰に導入されていることに起因する。

また、エッチングモニタに第3の実施形態と同様のX線を用いる場合には、p型クラッド層44に相当する回折ピークが消失した段階で、進行中のエッチングがエッチング停止層43に到達したことを確認することができる。

第5の実施形態により作製した半導体レーザ装置に、実際に室温で直流電流を印加すると、連続発振動作に到り、その動作特性は第1の実施形態に係る半導体レーザ装置と同程度である。

このように、第5の実施形態によると、エッチング対象のp型クラッド層44の下側にエッチング停止層43を形成するため、p型クラッド層44の膜厚（残し厚）を高精度で制御できるようになる。このため、p型クラッド層44にエッチング残りが生じることなく、所望の膜厚、すなわち最適値を得ることができる。その結果、MQW活性層における光閉じ込め効率が大幅に改善される。これは、MQW活性層に対するエッチングダメージが防止されていることによる。

さらに、基板上にエッチング停止層43を形成すると、径が約5.1cmの基板面内で、エッチングの残し厚のばらつきが抑制されるため、半導体レーザ装置の歩留りが向上するので、コストの低減に大きく寄与する。

なお、第5の実施形態においては、エッチング停止層43をp型クラッド層42の全面に形成したが、部分的に形成してもよい。但し、この場合には、p型クラッド層42の面内におけるエッチングむらを考慮して、複数箇所に分散してエッチング停止層44を形成することが好ましい。例えば、p型クラッド層42上におけるレーザ構造から除去される領域に形成すると、半導体レーザ装置の動作特性に影響を与えることが一切なくなる。その結果、エッチング停止層43はその光学的電气的特性に規制されなくなるので、エッチング停止層43の構成の自由度が大きくなる。

また、第5の実施形態においては、基板の表面側から該基板に向かってエッチ



ングを行なうが、これに限らず、基板の表面側以外の面から、例えば側面側からドライエッチングを施して、エッチング停止層43のみを選択的に残し、積層された半導体層の側面を凹凸状とすることも可能である。この半導体側面に形成された凹凸形状をデバイス形成時に応用しても良い。

なお、以上説明した第1の実施形態及びその変形例乃至第5の実施形態においては、エピタキシャル成長させる化合物半導体にIII-V族窒化物半導体を用いたが、ヒ化ガリウム(GaAs)やリン化インジウム(InP)等の他のIII-V族化合物半導体であってもよい。

また、エッチング停止層の下側に形成する半導体層は、セレン化亜鉛(ZnSe)等のII-VI族化合物であってもよい。

また、半導体レーザ装置の構造は、図5(a)等に示す構造に限られない。

また、半導体装置はレーザ装置に限られず、III-V族化合物半導体を含み、製造時に、III-V族化合物半導体をドライエッチングにより選択的に加工する必要がある半導体装置であればよい。

0993774-112701

【クレーム】

1. 半導体の製造方法は、

第1の半導体層の上に、エッチング停止層を形成する第1の工程と、

前記エッチング停止層の上に、III-V族化合物半導体からなる第2の半導体層を形成する第2の工程とを備え、

前記エッチング停止層のドライエッチングによるエッチングレートは、前記第2の半導体層のエッチングレートよりも小さい。

2. クレーム1の半導体の製造方法は、

前記第1の工程において、前記エッチング停止層を、アルミニウムを含むII-I-V族化合物半導体により形成する。

3. クレーム2の半導体の製造方法において、

前記第2の半導体層はアルミニウムを含み、

前記第1の工程において、前記エッチング停止層のアルミニウムの組成を、前記第2の半導体層のアルミニウムの組成よりも大きくなるように形成する。

4. クレーム1の半導体の製造方法は、

前記第1の工程において、前記エッチング停止層を、 $Al_xGa_{1-x}N$ （但し、 $0 \leq x \leq 1$ とする）と $Al_yGa_{1-y}N$ （但し、 $0 \leq y \leq 1$ 、 $x \neq y$ とする）とを交互に積層してなる超格子層とする。

5. クレーム4の半導体の製造方法において、

前記エッチング停止層を、波長が約360nm以上且つ500nm以下の光を反射する膜厚を持つ反射鏡とする。

6. クレーム1の半導体の製造方法において、

前記エッチング停止層は、III-V族窒化物半導体に含まれる元素と、III-V族窒化物半導体の導電性を決定する不純物元素とからなる。

7. クレーム6の半導体の製造方法において、

前記III-V族窒化物半導体に含まれる元素は窒素であり、前記不純物元素はシリコンである。

8. クレーム6の半導体の製造方法において、

前記不純物元素はマグネシウムである。

9. クレーム 8 の半導体の製造方法において、

前記マグネシウムの不純物濃度は、約  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以上である。

10. クレーム 1 の半導体の製造方法において、

前記第 2 の工程よりも後に、前記第 2 の半導体層に対してドライエッチングを行なう第 3 の工程をさらに備え、

前記第 3 の工程において、前記エッチング停止層を検出したときに、前記第 2 の半導体層に対するエッチングを停止する。

11. クレーム 10 の半導体の製造方法において、

前記第 3 の工程は、

前記第 2 の半導体層の表面にレーザ光を照射する工程と、

前記レーザ光により励起されて発せられるフォトルミネッセンス光を受光する工程と、

受光したフォトルミネッセンス光の波長の変化を検出することにより、前記エッチング停止層の表面が露出したことを推定する工程とを含む。

12. クレーム 10 の半導体の製造方法において、

前記第 3 の工程は、

前記第 2 の半導体層の表面に X 線を照射する工程と、

前記 X 線の回折角度を測定する工程と、

前記第 2 の半導体層による回折角度の変化を検出することにより、前記エッチング停止層の表面が露出したことを推定する工程とを含む。

13. 半導体装置の製造方法は、

基板上に、活性層を含む第 1 の半導体層、エッチング停止層及び III-V 族化合物半導体からなる第 2 の半導体層を順次形成する工程と、

前記第 2 の半導体層に対して選択的にドライエッチングを行なう工程とを備え、

前記エッチング停止層のドライエッチングによるエッチングレートは、前記第 2 の半導体層のエッチングレートよりも小さい。

[illegible]

- 28 -